중실원형 철근콘크리트 교각의 횡방향 철근에 따른 내진성능평가

Seismic Performance Assessment of Circular Reinforced Concrete Bridge Piers with Confinement Steel

김 태 훈* 강 상 규** 이 지 영*** 김 영 진***
Kim, Tae Hoon Kang, Sang Gyu Rhee, Ji Young Kim, Young Jin

ABSTRACT

The purpose of this study is to assess the seismic performance of reinforced concrete bridge piers using inelastic finite element analysis. The accuracy and objectivity of the assessment process may be enhanced by the use of sophisticated nonlinear finite element analysis program. A computer program, named RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of reinforced concrete structures was used. The proposed numerical method for the seismic performance assessment of reinforced concrete bridge piers is verified by comparison with the reliable experimental results.

1. 서 론

국내에서 교량에 대한 내진설계기준이 제정된 이후, 철근콘크리트 교각에 과도하게 배근되는 심부구속철근으로 인하여 현장시공에 많은 어려움을 겪고 있다. 그 이유로는 철근콘크리트 교각의 내진설계 개념과 설계기준을 합리적으로 반영하지 못한 설계가 수행되고 있다는 것을 들 수 있으나, 현행 도로교설계기준[1] 내진설계규정 중 심부구속철근량에 대한 최소규정이 중·약진 지진지역인 우리나라의 경우에는 다소 과도한 것이 아닌가 하는 의문이 제기 되고 있다[2].

이 연구에서는 다자유도계 구조물의 적용에 한계를 보일 수 있는 역량스펙트럼법의 단점을 보완한 기존의 지진손상 평가법[3]에 수정을 가하여 철근콘크리트 교각의 내진성능을 해석적으로 평가하고자 한다.

철근콘크리트 부재의 거동은 콘크리트의 균열, 철근의 항복, 철근과 콘크리트의 부착작용 및 균열면에서의 전단전달효과 등과 같은 재료적인 특성에 크게 지배되기 때문에, 이를 해석적으로 예측하기 위해서는 각각의 재료적인 특성을 정확하고 신뢰성 있게 표현할 수 있는 재료모델의 구축이 선행되어

*정회원, 대우건설기술연구소 전임연구원, 공학박사
**정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 연구원, 공학석사
***정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 연구원, 공학석사
****정회원, 대우건설기술연구소 수석연구원, 공학박사

야 한다. 따라서 이 연구에서는 2축 응력 상태에 대한 직교 이방성 재료모델에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 요소의 거동특성을 표현하고, 이를 유한요소법을 사용하여 확장한 기존의 검증된 프로그램[3-5]에 수정을 가하여 철근콘크리트 교각의 내진성능을 평가하고자 한다.

2. 비선형 유한요소해석에 의한 내진성능평가

2.1 손상지수평가

손상지수 $D.I.$는 손상이 없는 0.0으로부터 파괴를 나타내는 1.0까지로 표현되며 손상지수 0.75는 파괴의 시점을 알린다. 일반 구조물에 대한 각각의 손상지수의 값을 이 연구의 대상인 철근콘크리트 교각에 적용하면, 보수가 가능한 손상지수 값 0.1은 주철근의 항복이 일어나기 전으로서 경미한 휨균열이 발달한 상태로, 보수가 불가능한 손상지수 값 0.4는 주철근이 항복한 후 매우 큰 휨 또는 전단균열에 의해서 콘크리트의 피복이 박리된 상태로, 파괴 시점의 손상지수 값인 0.75는 주철근의 파단이 일어나기 시작한 상태로, 그리고 손상지수 값 1.0은 주철근이 대부분 파단되어 붕괴된 상태로 설명할 수 있다[3,5].

2.2 내진성능 평가기법

이 연구에서는 기존의 지진손상 평가법[3,5]을 수정하여 표 1과 같이 성능수준과 함께 비교하여 나타냄으로써 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가가 가능하도록 하였다. 완전기능 수준은 손상이 거의 발생하지 않아 보수가 요구되지 않으며 기능수행 수준은 경미한 손상이 발생하여 보수가 필요한 상태이다. 그리고 붕괴방지 수준은 심각한 손상이 발생하여 부분 또는 전체적인 보수 및 보강이 필요한 상태를 의미한다.

표 1 성능수준 상세와 지진손상 평가

Performance level	Service	Repair	Damage	
			State	Index
Fully operational	Full service	Limited epoxy injection	Hairline cracks	0.1
Delayed operational	Limited service	Epoxy injection Concrete patching	Open cracks Concrete spalling	0.4
Stability	Not useable	Replacement of damage section	Bar buckling/Fracture Core crushing	0.75

2.3 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소[3-5] 그리고 경계면요소[3-5] 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP[6]에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(**R**einforced **C**oncrete **A**nalysis in **H**igher **E**valuation **S**ystem **T**echnology)를 수정하여 사용하였다.

3. 횡방향 철근에 따른 구조거동 실험

실험체는 휨파괴를 유도하기 위해 형상비($=M/Vd$)가 4.0인 총 14개 철근콘크리트 교각으로 구성되어 있으며 축력비, 축방향 철근비, 그리고 횡방향 철근비를 주요변수로 설계하였다.

각 실험체는 기초부, 기둥부, 가력부로 구성되어 있고 기둥부의 단면은 직경이 600 mm인 원형을 이루고 있으며 기초부 상부로부터 가력점까지의 높이는 모두 2.4 m이다. 실험체 제작에 사용된 축방향 철근 및 횡방향 철근의 항복강도는 3583 kgf/cm^2 (351 MPa)과 4000 kgf/cm^2 (392 MPa)이며 콘크리트의 설계기준강도는 228 kgf/cm^2 (22.4 MPa)이다.

횡방향 철근에 따른 교각의 비선형 거동특성을 파악하기 위하여 기둥의 가력지점에서의 횡방향 변위와 하중을 측정하였으며, 축방향 및 횡방향 철근에 스트레인 게이지를 설치하여 철근의 변형률 변화를 측정하였다.

4. 해석결과 및 분석

이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 원형 철근콘크리트 교각을 등가환산단면을 이용하여 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하였다[3-5].

그림 1 ~ 그림 2는 이 연구의 해석기법과 모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 내진성능평가를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이 연구에서는 하중-변위관계와 하중재하에 따른 손상지수의 변화를 성능수준과 함께 비교·검토하여 교각실험체의 내진성능을 평가하였다. 이러한 해석결과는 실험체에 반복 주기하중이 진행되는 동안 소성힌지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이로 인한 손상이나 파괴와 잘 일치하고 있다(표 2).

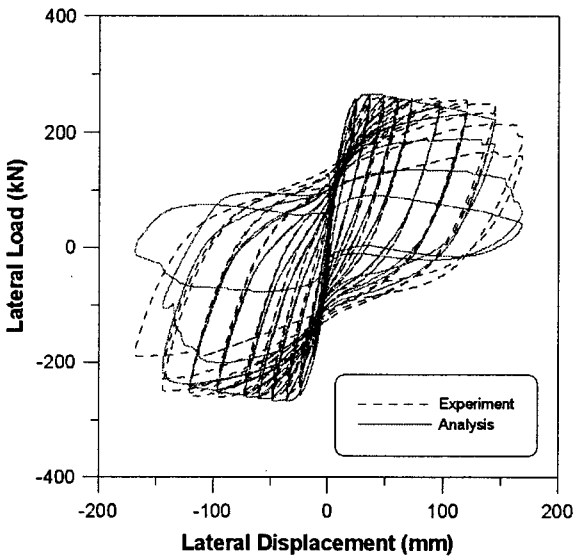

그림 1 하중-변위 곡선(CC20-45-2)

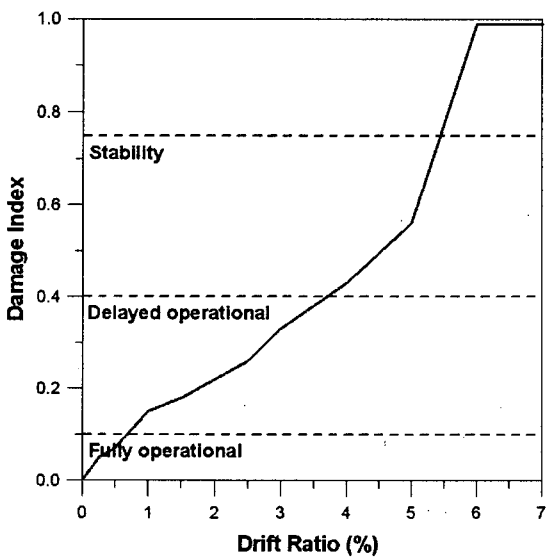

그림 2 실험체 CC20-45-2의 내진성능평가

표 2 실험체 CC20-45-2의 내진성능평가

Drift Level (%)	Experiment	Analysis	
	Notes	Damage Index	Performance Level
0.25	First cracking	0.05	Fully operational
2.0	Spalling	0.26	Delayed operational
3.0	Significant spalling	0.33	Delayed operational
5.0	Visible buckling of longitudinal bars	0.56	Stability
7.0	Fracture of longitudinal bar	0.99	-

5. 결 론

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델이 지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 전반적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다. 또한 하중 재하에 따른 구조물의 손상정도를 수치적으로 표현하며 전체 구조물의 성능특성을 나타낼 수 있는 손상지수에 의한 내진성능 평가기법을 개발하였다.

감사의 글

이 연구에서 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST의 사용을 허락해주시고 조언을 해주신 성균관대학교 토목환경공학과의 신현목 교수님께 진심으로 감사드립니다.

참고 문헌

1. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2005.
2. 손혁수, 이재훈, "지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 소요연성도에 따른 심부구속철근량," 한국콘크리트학회 논문집, 제15권, 5호, pp. 715-725.
3. 김태훈, "비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가," 박사학위 논문, 성균관대학교, 2003.
4. Kim, T. H., Lee, K. M., Yoon, C. Y., and Shin, H. M., "Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake. I: Theory and Formulation," Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003, Vol. 129, No. 9, pp. 1199-1207.
5. Kim, T. H., Lee, K. M., Chung, Y. S., and Shin, H. M., "Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns," Engineering Structures, 2005, Vol. 27, No. 4, pp. 576-592.
6. Taylor, R. L., FEAP - A Finite Element Analysis Program, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.